

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
29. August 2002 (29.08.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/065899 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: A61B 3/11, 3/113

DOERING, Axel [DE/DE]; Magdalstieg 140, 07745 Jena (DE). BEHRENDT, Frank [DE/DE]; Kritzegraben 1, 07743 Jena (DE). VOIGT, Klaus-Ditmar [DE/DE]; Damaschkeweg 5, 07745 Jena (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/01675

(22) Internationales Anmelddatum:  
16. Februar 2002 (16.02.2002)

(74) Gemeinsamer Vertreter: CARL ZEISS JENA GMBH;  
Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): CA, CZ, HU, IL, JP, KR,  
MX, SG, US.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT,  
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,  
NL, PT, SE, TR).

(30) Angaben zur Priorität:  
101 08 797.7 21. Februar 2001 (21.02.2001) DE

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu  
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US*): CARL ZEISS JENA GMBH [DE/DE]; Carl-Zeiss-  
Promenade 10, 07745 Jena (DE).

Zur Erklärung der Zwei-Buchstaben-Codes und der anderen  
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on  
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe  
der PCT-Gazette verwiesen.

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): BERGNER, Roland  
[DE/DE]; Anna-Siemsen-Str. 97, 07745 Jena (DE).  
BARTH, Roland [DE/DE]; Am Hang 5, 07743 Jena (DE).

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING DISTANCES IN THE ANTERIOR OCULAR SEGMENT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR ERMITTlung VON ABSTÄNDEN AM VORDEREN AUGENABSCHNITT

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining distances in the anterior ocular segment, preferably of the pupils and/or the diameter of the iris, wherein the image of at least part of the eye is recorded and digitized using an imaging device and an array for illuminating the eye. On the basis of said digital image, a center of gravity analysis and the determination of the central point are carried out, especially for the position of the pupils, by conducting an intensity and threshold analysis as rough determination. Based on said rough determination, a fine detection of the position of the edges of the pupil and/or the edges of the iris is carried out. Additionally, the angle between the visual axis and the optical axis of the eye can be determined from the position of a fixed reflection to the center of the pupil and/or the center of the iris.

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Ermittlung von Abständen am vorderen Augenabschnitt, vorzugsweise des Pupillen und/oder Irisdurchmessers, wobei mittels einer Bildaufnahmeeinheit und einer Anordnung zur Beleuchtung des Auges das Bild mindestens eines Teiles des Auges erfasst wird und digitalisiert wird und aus dem digitalen Bild über eine Intensitäts - Schwellenanalyse als Grobbestimmung eine Schwerpunktanalyse und Mittelpunktbestimmung, insbesondere für die Lage der Pupille, erfolgt und anhand der Grobbestimmung eine Feindetektion der Lage der Pupillenkanten und/oder Iriskanten durchgeführt wird und zusätzlich aus der Lage eines Fixierreflexes zum Pupillenmittelpunkt und/oder Irismittelpunkt der Winkel zwischen Sehachse und optischer Achse des Auges bestimmt werden kann.

**WO 02/065899 A2**

## Verfahren zur Ermittlung von Abständen am vorderen Augenabschnitt

Für die IOL( Intraokularlinse) -Berechnungsformel "Holladay 2" ("Intraocular Lens Power Calculations for the Refractive Surgeon", Jack T. Holladay, in: Operative Techniques in Cataract and Refractive Surgery, Vol. 1, No 3 (September), 1998: pp 105-117) , mit welcher die Stärke einer in das menschliche Auge zu implantierenden Intraokularlinse (IOL) berechnet werden kann, sowie für die Auswahl spezieller IOL Typen (ICL u.a.) wird als ein Eingangsparameter der sogenannte "horizontale-white-to-white-Abstand" (hor-w-t-w) benötigt. Das ist der horizontale Durchmesser der Iris.

Für die Hornhautchirurgie zur Beseitigung von Fehlsichtigkeiten des menschlichen Auges (PRK, LASIK) ist es für den Operateur auch von Interesse, an welchem Punkt die Sehachse des Patienten die Hornhaut durchstößt. Danach kann die Laserabtragung von diesem Punkt aus präziser erfolgen, als mit der bisherigen Annahme, welche vom geometrischen Mittelpunkt der Hornhaut ausgeht.

Für die interferometrische Längenmessung der Hornhautdicke, Vorderkamertiefe und Linsendicke am menschlichen Auge mittels PCI ist es notwendig, das Auge entlang seiner hypothetischen optischen Achse vor dem Meßgerät voreinzustellen, im Unterschied zur Achslängenmessung, bei welcher das Auge entlang der tatsächlichen Sehachse positioniert werden muß.

Zur Ermittlung des "hor-w-t-w" werden bisher Lineale bzw. Schablonen verwendet (Fig.11 und <http://www.asico.com/1576.htm>), welche dem Patientenauge vorgehalten werden und damit der Durchmesser der Iris durch Peilen abgelesen wird. Dieses Verfahren ist störanfällig gegenüber Parallaxe beim Beobachten und die bisher verwendeten Schablonen haben eine Abstufung von 0,5 mm. Damit ist nur eine eingeschränkte Genauigkeit möglich. Eine andere bekannte Lösung sind Meßokulare, welche an Spaltlampengeräten als Zubehör zum Einsatz kommen (Gebrauchsanweisung Spaltlampe 30 SL/M Druckschriften Nr: G 30-114-d (MA XI/79) Carl Zeiss D-7082 Oberkochen, Seite 38). Diese verhindern zwar Parallaxefehler, es muß aber an einer Skala der Durchmesserwert abgelesen werden.

Weiterhin sind invasive Meßmittel in Form von mechanischen Meßschiebern bekannt, welche durch einen Schnitt in der Sklera in die Vorderkammer eingeführt werden (z.B. US 4319564).

Weiterhin sind sogenannte Gonioskope bekannt, welche auf das Auge aufgesetzt werden, Skalen auf die Iris projizieren und durch Lupen kann der Irid Durchmesser abgelesen werden (z.B. US 4398812).

Vorrichtungen, welche den Durchmesser der Pupille messen sind sogenannte Pupillometer (z.B. EP 0550673). Diese messen aber nicht den Durchmesser der Iris.

Für die Bestimmung des Durchtrittspunktes der Sehachse durch die Hornhaut sind keine Vorrichtungen bekannt. In der Kamera Industrie werden lediglich Verfahren verwendet, welche die Blickrichtung eines menschlichen Auges detektieren; die Ausgangssignale solcher Anordnungen dienen zum Beispiel der Steuerung von Autofokusmechanismen in Fotokameras (z.B. US 5291234) bzw. sie werden in sogenannten Eyetrackern eingesetzt. Diese Geräte überwachen die Augen- bzw. Blickbewegungen.

Zur Voreinstellung des Auges entlang der optischen Achse sind ebenfalls keine Vorrichtungen bekannt; es wird durch Umfixieren des Auges bzw. Scannen des Meßstrahles relativ ungezielt versucht, die richtige Positionierung des Auges entlang der optischen Achse durch Probieren zu finden.

Aus WO 00/33729 der Anmelderin ist eine Anordnung und ein Verfahren bekannt, um mittels eines einzigen Gerätes zur Berechnung der optischen Wirkung einer Introkularlinse berührungslos die Achslänge,

Hornhautkrümmung und Vorderkammertiefe des Auges zu bestimmen.

Das Auge wird über sichtbare oder IR -LED-s allgemein beleuchtet, wobei deren Reflexbilder mittels der CCD Kamera erfaßt und dargestellt werden.

Weiterhin ist ein Fixierlicht vorgesehen, damit der Proband die Augenpupille in Richtung der optischen Achse ausrichtet, wobei der Reflex des Fixierlichtes ebenfalls von der CCD - Kamera erfaßt wird.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung und ein Verfahren zu schaffen, welches bedienerunabhängig eine höhere Genauigkeit der hor-w-t-w Bestimmung zuläßt. Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche beschrieben. Bevorzugte Weiterbildungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Überraschend realisiert die Erfindung auch eine praktikable Möglichkeit den Durchtrittspunkt der Sehachse durch die Hornhaut in Bezug auf den Mittelpunkt der Pupille und / oder Iris zu beschreiben und aus der Position dieses Durchtrittspunktes und der geometrischen Mitte der Hornhaut eine präzisere Voreinstellung eines interferometrischen Längenmeßgerätes entlang der optischen Achse des Auges vornehmen zu können.

Bisher war die Lage der Sehachse dem Gerätebediener unbekannt; deshalb wurde der Patient mit geeigneten Mitteln (Fixierlicht im Gerät oder außerhalb des Gerätes für das Partnerauge) aufgefordert, umzufixieren. Im Anschluß wurde ein Meßvorgang ausgelöst, der aber nur erfolgreich ist, wenn die Messung entlang der optischen Achse erfolgte. Das bedeutet, daß erst im Anschluß an den Meßvorgang klar wird, ob diese Achse getroffen wurde oder nicht.

In Schritten von  $1^\circ$  wird das Fixierlicht bewegt; es können recht viele unbrauchbare Meßvorgänge erforderlich werden, bis die Stelle erreicht wird, wo die interferometrische Messung erfolgreich ist.

Für die ophthalmologische Routine ist diese Vorgehensweise nicht akzeptabel.

#### Ausführungsbeispiel:

Die Erfindung wird nachstehend anhand der schematischen Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen:

Fig.1: Den schematischen Ablauf des erfindungsgemäßigen Verfahrens

Fig.2: Den Algorithmus zur Grobdetektion der Pupille

Fig.3: Eine Darstellung zur Grauwertanalyse / Mittelpunktsermittlung

Fig.4: Eine Darstellung der Kantenanalyse

Fig.5: Den schematischen Ablauf der Kantenanalyse

Fig.6: Die Detektion und Ermittlung der Lage des Fixierungspunktes

Fig.7: Den schematischen Ablauf der Plausibilitätskontrolle

Fig.8: Den Beleuchtungs/Detektionsstrahlengang

Fig.9: Ein Überblicksbild des zu vermessenden Auges

Fig.10: Die vergrößerte Darstellung des Zentrums in Fig.9

Fig.11: Eine Weiss zu Weiss Schablone nach Holladay-Godwin

Das Probandenauge 1 wird gemäß Fig.8 durch vorzugsweise infrarot strahlende kreisförmig um die optische Achse angeordnete Lichtquellen 2, wie in WO 00/33729 (z.B. LED) beleuchtet. Im Beobachtungssystem wird koaxial zum Beobachtungsstrahlengang eine Lichtquelle 3 über einen Strahlteiler 4 eingeblendet, welche sichtbares Licht aussendet (z.B. LED oder Laserdiode), auf welche der Proband fixiert.

Das Bild des Auges wird über ein telezentrisches Abbildungssystem 5 auf einen Bildsensor 6, vorzugsweise eine CCD - Kamera, der mit einer nicht dargestellten Steuer- und Auswerteeinheit verbunden ist, abgebildet. Das Videosignal der Kamera wird auf einem (nicht dargestellten) Monitor oder LC Display dargestellt.

Der Bediener kann sich durch die Beleuchtung 2 während der gesamten Zeit der Einjustierung und der Vermessung des Probanden davon überzeugen, daß der Proband richtig fixiert - und somit das Meßergebnis unverfälscht ist.

Die Abbildung des Probandenauges mit den relevanten Bildausschnitten wird telezentrisch durchgeführt, um den Einfluß der Probandenjustierung zu minimieren.

Das BAS - Signal der CCD - Kamera wird nach der korrekten Einjustierung des Patientenauges und nach Auslösung durch den Bediener mittels Frame Grabber in den Speicher eines Rechners in die Auswerteeinheit übernommen. In Fig.9 ist ein derartiges Bild schematisch dargestellt, mit Pupille 7, Pupillendurchmesser 9 sowie Iris 8 und Irisdurchmesser 10.

Fig.10 zeigt einen vergrößerten Abschnitt der Pupille mit Reflexpunkten 11 der Beleuchtung, dem Bild des Fixierlichtes 12, Irismittelpunkt 13 und Pupillenmittelpunkt 14.

Mit Mitteln der Bildverarbeitung werden die Abstände im Bild ermittelt, aus denen über den Abbildungsmaßstab der Beobachtungsoptik folgende Größen berechnet werden können:

- der Durchmesser und der Mittelpunkt der Iris,
- der Durchmesser und der Mittelpunkt der Pupille,
- die x- und y-Koordinaten des Hornhautbildes des Fixierlichtes (1. Purkinjebild) in Bezug auf den Mittelpunkt der Iris und

- die x- und y-Koordinaten des Hornhautbildes des Fixierlichtes ( 1.Purkinjebild) in Bezug auf den Mittelpunkt der Pupille

Da die realen Formen von Iris und Pupille des menschlichen Auges nicht notwendigerweise Kreise sein müssen, können in einer weiteren Ausführungsform auch Ellipsen mit ihren Parametern Halbachsen und Brennpunkte bestimmt werden.

Die Meßgrößen lassen sich bei geeigneter Wahl des Abbildungsmaßstabes der Abbildungsoptik 5 mit einer rechnerischen Genauigkeit von  $< \pm 0,01$  mm bestimmen.

Der Durchmesser der Iris ergibt den horizontalen white-to-white Abstand:  
white-to-white [in mm] =  $\varnothing_{\text{iris}}$  [in Pixeln] / Anzahl der Pixel pro mm

Die x- und y-Koordinaten des Purkinjebildes des Fixierlichtes ergeben den Durchstoßungspunkt der Sehachse durch die Hornhaut unter der Voraussetzung, daß der Proband richtig fixiert, was der Bediener anhand des Video-life-Bildes auf dem LC-Display während der Messung kontrollieren kann. Sehachse und opt. Achse können bis zu  $8^\circ$  voneinander abweichen, da die Fovea  $3^\circ$  nasal bis  $8^\circ$  temporal versetzt liegen kann.  
( Vereinfachtes schematisches Auge nach Gullstrand in Diepes "Refraktionsbestimmung" Verlag Bode, Pforzheim , 5. Auflage 1988).

Der Winkel zwischen der Sehachse und der optischen Achse des Auges ergibt sich aus Winkelbeziehungen beispielsweise anhand des Gullstrand- Auges, in welche die gemessene Ablage ( Abstand) des Bildes des Fixierungspunktes vom Iris- und/oder Pupillenmittelpunkt eingeht.  
Vor der interferometrischen Vermessung der vorderen Augenmedien wird die Abweichung beider Sehachsen zueinander bestimmt.  
Der Fixierungspunkt des vorliegenden Meßsystems markiert sich entlang der Sehachse. Der Bertrag und die Richtung des Abstandes dieses Punktes zur Pupillenmitte (und oder Irismitte) wird ermittelt.

Durch einfache trigonometrische Formeln erhält man den gesuchten Winkel zwischen optischer Achse und Sehachse , beispielsweise zu

$$\alpha = \text{arc tan} (a / k)$$

$\alpha$  - Winkel zwischen Seh- und opt. Achse

a – Abstand Fixierpunkt zur Pupillenmitte (Irismitte)

k – Abstand Knotenpunkt ( s. Literatur Diepes) zur Hornhaut minus R/2 (etwa 3,8 mm)

Entsprechend dieses Meßwertes kann vorteilhaft eine Voreinstellung der Blickrichtung des Patienten erfolgen, indem dem Patienten ein Fixierlicht unter dem errechneten Winkel  $\alpha$  angeboten wird. Damit wird ein aufwendiges Suchverfahren überflüssig.

## Verfahren zur Lagebestimmung von Pupille, Iris und Fixierpunkt

### ***Ablaufplan ( Fig.1):***

Als Eingabegröße der Auswertung wird eine digitalisierte Graubildaufnahme verwendet, in einem Abbildungsmaßstab, der eine Erfassung der gesamten Iris erlaubt, mit eingeschalteter Umfeldbeleuchtung.

In der Auswerteeinheit werden nach Rauschunterdrückung die Objekte Pupille, Iris und Fixierpunktbild bestimmt.

Vorteilhaft wird zunächst das Pupillenbild grob ermittelt und zur Irisdetektion herangezogen, da der Kontrast an der Iriskante in der Regel schwach ist und außerdem der Irisrand oben und unten durch Augenlider verdeckt sein kann, so daß keine kreisförmige sondern nur eine sektorförmige Erfassung möglich ist.

Bei erfolgreicher Abarbeitung werden die Parameter der Iris und der Pupille als Kreismodell (Radius, Mittelpunkt) oder als Ellipsenmodell (Hauptachsen, Mittelpunkt) zurückgegeben. Der Fixierpunkt (d.h. der Durchtrittspunkt der Sehachse durch die Kornea) wird in seinen Koordinaten zurückgegeben, d.h., die Koordinaten stehen dem aufrufenden Programm zur Verfügung.

### ***Rauschunterdrückung***

Eine Kantendetektion auf der Basis von Grauwertprofilen im Originalbild führt zu großen Streuungen bei der Bestimmung der Kantenorte, die auf ein dem Bildsignal überlagertes Rauschen zurückzuführen sind. Zur Rauschunterdrückung wird ein 20x20-Medianfilter eingesetzt.

### ***Grobdetektion der Pupille- Fig.2/Fig.3***

Zur groben Bestimmung der Pupillenlage wird ein Binarisierungsverfahren mit anschließender Suche nach zusammenhängenden Objekten im Binärbild verwendet.

In Fig.3 ist eine von der CCD Kamera erfaßte unregelmäßige Grauwertverteilung  $g(x,y)$ , ermittelt durch Schwellwertanalyse (Schwellwert 1), in einem X/Y Koordinatensystem dargestellt. Von dieser Fläche wird über eine Schwerpunktanalyse der theoretische Mittelpunkt  $x_0, y_0$  bestimmt und ein

Kreismodell/ Ellipsenmodell mit einem Radius R ermittelt. (Das wird weiter unten erklärt.)

Als Binarisierung wird die pixelweise Grauwerttransformation nach

$$b(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } g(x,y) \geq thr \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

verstanden, wobei gilt:

x	horizontale Koordinate eines Pixels
y	vertikale Koordinate eines Pixels
g(x,y)	Grauwert des Pixels an der Stelle (x,y)
thr	nicht-negativer Schwellwert

Als Pupille wird dasjenige Binärobject angenommen, das eine vorgegebene Mindestgröße überschreitet und dem Bildmittelpunkt am nächsten liegt.

Ein Binarisierungsverfahren mit konstantem Schwellwert ist – wegen seiner Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit – nicht geeignet. Daher werden nach o.g. Verfahren Binärobjecte für eine Folge von Schwellwerten bestimmt. Als „optimaler“ Schwellwert  $thr^*$  wird derjenige Wert angenommen, bei dessen Inkrementierung die geringste Veränderung beim ausgewählten Binärobject (d.h., Lage und Größe) stattfindet. Aus dem diesem Schwellwert zugeordneten Binärobject werden als Grobschätzung der Pupillenlage folgende Größen bestimmt:

$$x_0 = \frac{\sum g(x,y) \cdot x}{\sum g(x,y)}$$

(Summation über alle Pixel des Bildes)

$$y_0 = \frac{\sum g(x,y) \cdot y}{\sum g(x,y)}$$

wobei

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sum g(x,y)}$$

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & (x,y) \in \text{Binärobject} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$(x_0, y_0)$  Flächenschwerpunkt des Binärobjekts (Mittelpunktskoordinaten)

R (Fläche des Binärobjekts /  $\pi$ ) $^{1/2}$  (geschätzter Radius).

***Feindetektion von Pupille und Iris- Fig.4***

Die Kantenorte für Pupille und Iris (Kante = "Rand" des Kreises/der Ellipse) werden aus Grauwertprofilen (=Abtastungen der Grauwerte des mediangefilterten Bildes entlang Strecken) durch den Mittelpunkt der grob bestimmten Pupille ermittelt (siehe Abbildung ). Für die Iris wird zunächst angenommen, daß sich die Kante in einem bestimmten größeren, konzentrisch zur grob detektierten Pupille angeordneten Kreisring befindet. Der folgende Algorithmus gilt sinngemäß sowohl für die Feindetektion der Pupillen- als auch der Iriskante.

Die Abtastung erfolgt mittels Suchstrahlen ( Suchrichtungen) S von  $x_0, y_0$  aus, wobei die Suchstrahlrichtung um einen Winkel  $\alpha$  sukzessive geändert wird.

Der grobe Suchbereich SB auf dem Suchstrahl S ergibt sich durch das bereits ermittelte grobe Modell von Iris und Pupille. Die Bestimmung der Pupillenkante K erfolgt über den gesamten Kreis, während die Iriskantenbestimmung wegen möglicher Lidabdeckung nur in einem Winkelbereich um die X-Achse erfolgt (2 Kreissektoren).

In diesen Profilen werden Wendepunkte durch eine geeignete Glättung und numerische Differentiation bestimmt. Hierzu ist eine Reihe von Verfahren (z.B. Savitzky A. and Golay, M.J.E. Analytical Chemistry, Vol. 36, S. 1627-39, 1964) bekannt, die sich als eindimensionale lineare Filter effizient implementieren lassen. Im allgemeinen wird eine Vielzahl von Wendepunkten entlang des Grauwertprofils gefunden. Als Kantenort wird unter diesen diejenige Position  $(x, y)$  ermittelt, die folgende Bedingungen erfüllt:

- (a)  $(x, y)$  liegt in einem Kreisring um  $(x_0, y_0)$ . (Grobposition der Pupille) mit einem inneren und äußeren Radius, der jeweils für die Pupillen- und Irisdetection in Abhängigkeit von  $r_0$  (Grobradius der Pupille) bestimmt werden kann
- (b) Die Differenz zwischen den um  $(x, y)$  im Grauwertprofil liegenden Extremwerten wird betragsmäßig maximal unter allen Positionen, die (a) erfüllen.

Damit stehen pro Grauwertprofil (d.h., pro Abtastwinkel  $\alpha$ ) maximal je zwei Kantenorte für die Iris- und die Pupillenmodellierung zur Verfügung. Zur Ausschaltung systematischer Störungen beispielsweise durch Abdeckung der Iris oder der Pupille bei verengter Lidspalte kann der verwendete Bereich von Abtastwinkeln eingeschränkt werden, d.h.

$\alpha_{\min, \text{Iris}} < \alpha < \alpha_{\max, \text{Iris}}$  für die Iriskantenbestimmung und analog  $\alpha_{\min, \text{Pupille}} < \alpha < \alpha_{\max, \text{Pupille}}$  für die Pupillenkantenbestimmung.

### Anpassung des Pupillen- / Irismodells - Fig.5

Aus der Menge der im vorhergehenden Schritt bestimmten Kantenorte  $(x_i, y_i)$  können die Parameter des anzupassenden Pupillen- und Irismodells (also entweder Kreis oder Ellipse) durch Regression bestimmt werden. Dies geschieht durch die Minimierung der Summe quadratischer Fehler

$$\sum_i (x_i - x(x_i, y_i, p))^2 + (y_i - y(x_i, y_i, p))^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

über die Menge möglicher Parametervektoren  $p$  (Kreis: Mittelpunktskoordinaten und Radius, Ellipse: Mittelpunktskoordinaten, Längen der Hauptachsen, Winkel der großen Hauptachse zur x-Achse). Für die Kreisanpassung ist eine Lösung von (1) unmittelbar und numerisch effizient mit dem Verfahren der Singulärwertzerlegung möglich. Für die Lösung des restringierten Quadratmittelproblems zur Ellipsenanpassung existiert ebenfalls eine Reihe von Standardansätzen (z.B. in Bookstein, F.L. Fitting conic sections to scattered data. Computer Graphics and Image Processing, Vol. 9, S. 56-71, 1979 und Fitzgibbon, A.W. and Fisher, R.B. A buyer's guide to conic fitting. Proceedings of British Machine Vision Conference, Birmingham, 1995).

Zur Reduktion des Einflusses von Ausreißern (d.h., falsch bestimmten Kantenorten) wird ein zweistufiges Regressionsverfahren nach Fig.5 verwendet.

Außerdem können alternative Verfahren zur Selektion der Kantenorte, die zur Parameteranpassung verwendet werden sollen, genutzt werden, wie beispielsweise die Hough-Transformation für Kreismodelle.

#### ***Detection des Fixierpunktes- Fig.6***

Zur Detektion des Fixierpunktes erfolgt eine Binarisierung ( siehe oben) des ungefilterten Bildes der CCD Kamera mit einem von  $thr^*$  (Schwellwert, der zur Grobdetektion der Pupille benutzt wurde) abhängigen Schwellwert  $\Theta_{FP} = s * thr^*$  ( $s > 1.0$ ). Als Fixierpunkt wird der Mittelpunkt des dem bestimmten Pupillenmittelpunkt PM am nächsten liegenden zusammenhängenden Binärobjektes BF (Grauwerte  $> \Theta_{FP}$ ) bestimmt, das eine bestimmte Mindestfläche aufweist .

Sonstige nicht relevante Binärobjekte (z.B. Reflexbilder der LED Beleuchtung) werden anhand ihrer größeren Entfernung vom Pupillenmittelpunkt identifiziert und bleiben unberücksichtigt.

***Plausibilitätskontrolle- Fig.7***

Vor der Rückgabe der ermittelten Koordinaten an das aufrufende Programm wird eine Plausibilitätskontrolle nach Fig. 7 vorgenommen, um zu verhindern, daß eventuell unrichtig detektierte Elemente gefunden wurden. Die Abfragen beinhalten vorher bekannte Eigenschaften des untersuchten Objektes, mit welchen die ermittelten Ergebnisse in Koinzidenz stehen müssen.

**Patentansprüche****1.**

Verfahren zur Ermittlung von Abständen am vorderen Augenabschnitt, vorzugsweise des Pupillen und/ oder Irid Durchmessers, wobei mittels einer Bildaufnahmeeinheit und einer Anordnung zur Beleuchtung des Auges das Bild mindestens eines Teiles des Auges erfaßt wird und digitalisiert wird und aus dem digitalen Bild über eine Intensitäts - Schwellenanalyse als Grobbestimmung eine Schwerpunktanalyse und Mittelpunktbestimmung, insbesondere für die Lage der Pupille, erfolgt und anhand der Grobbestimmung eine Feindetektion der Lage der Pupillenkanten und / oder Iriskanten durchgeführt wird.

**2.**

Verfahren zur Ermittlung der Sehachse , wobei mittels eines Fixierlichtes der Durchstoßpunkt der Sehachse durch die Hornhaut ermittelt wird

**3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei zusätzlich aus der Lage eines Fixierreflexes der Durchstoßpunkt der Sehachse durch die Augenhornhaut in Bezug auf die Pupille und/oder Iris ermittelt wird.**

**4.**

Verfahren einem der Ansprüche 1-3, wobei aus der Lage eines Fixierreflexes zum Pupillenmittelpunkt und/ oder Iridmittelpunkt der Winkel zwischen Sehachse und optischer Achse des Auges bestimmt wird

**5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei mittels des Winkels ein Gerät zur interferometrischen Vermessung der Teilabschnitte des menschlichen Auges entlang der optischen Achse dieses Auges voreingestellt wird.**

Fig.1

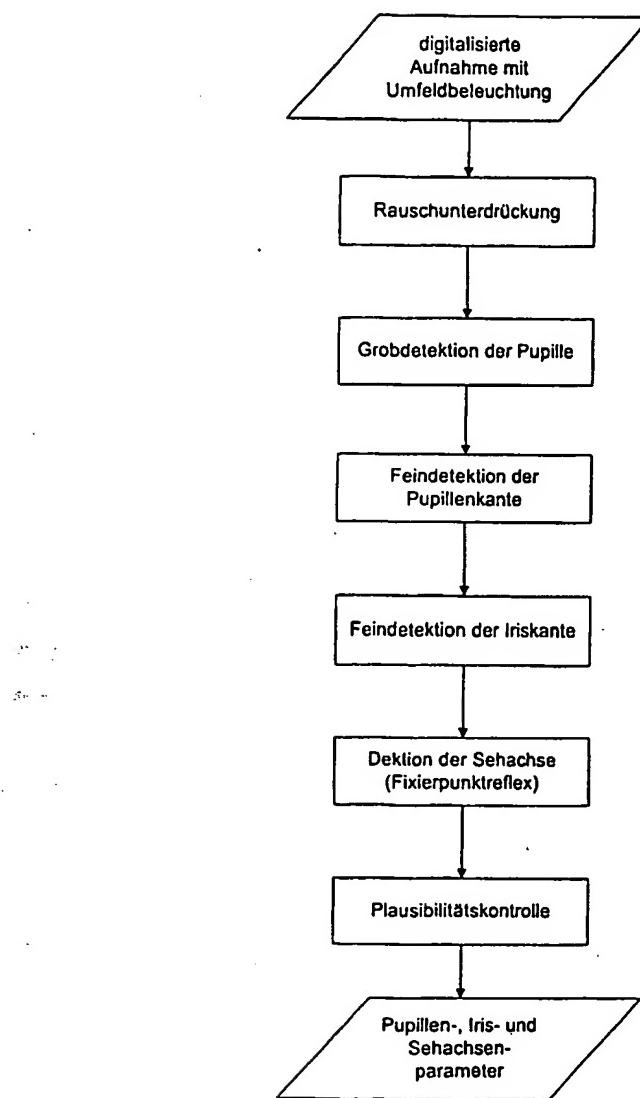


Fig.2

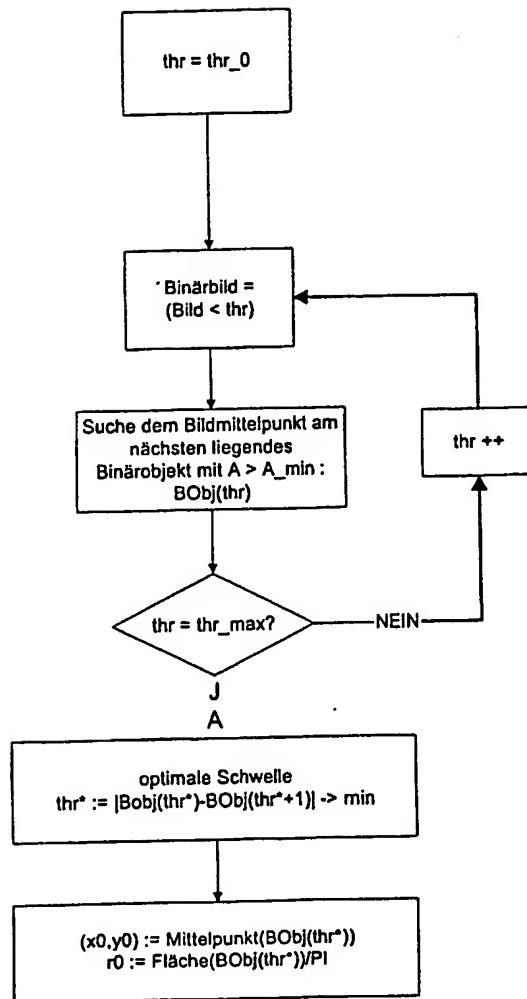


Fig.3

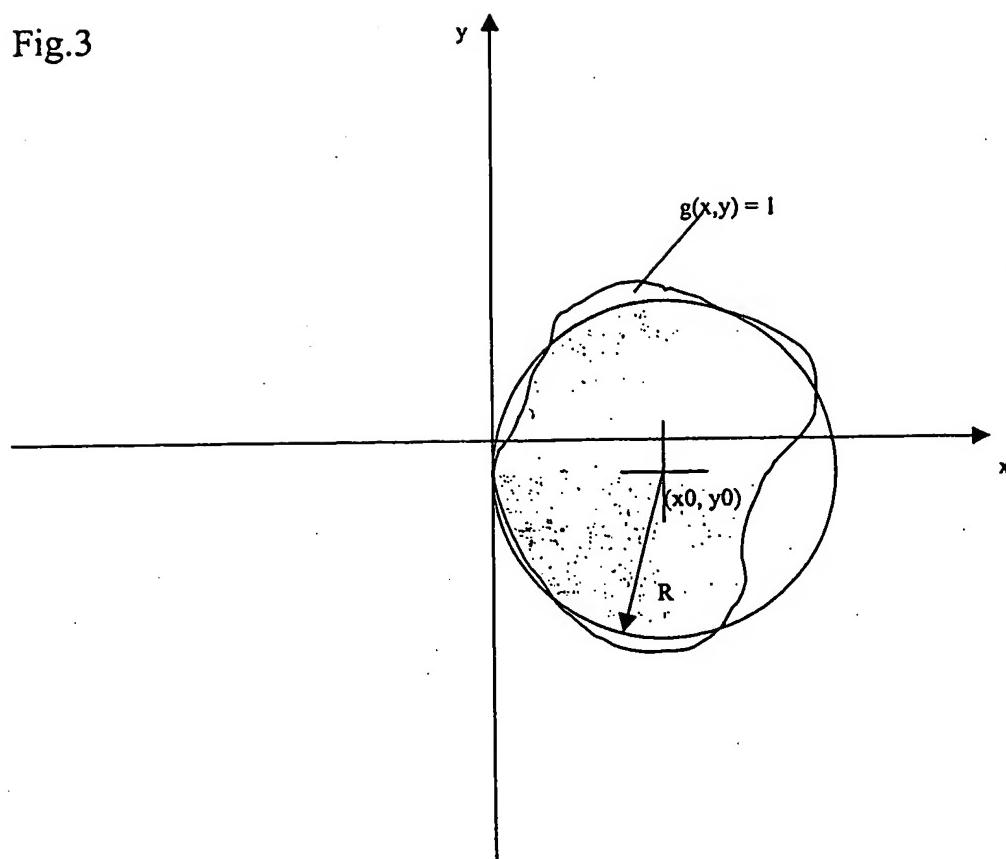


Fig.4

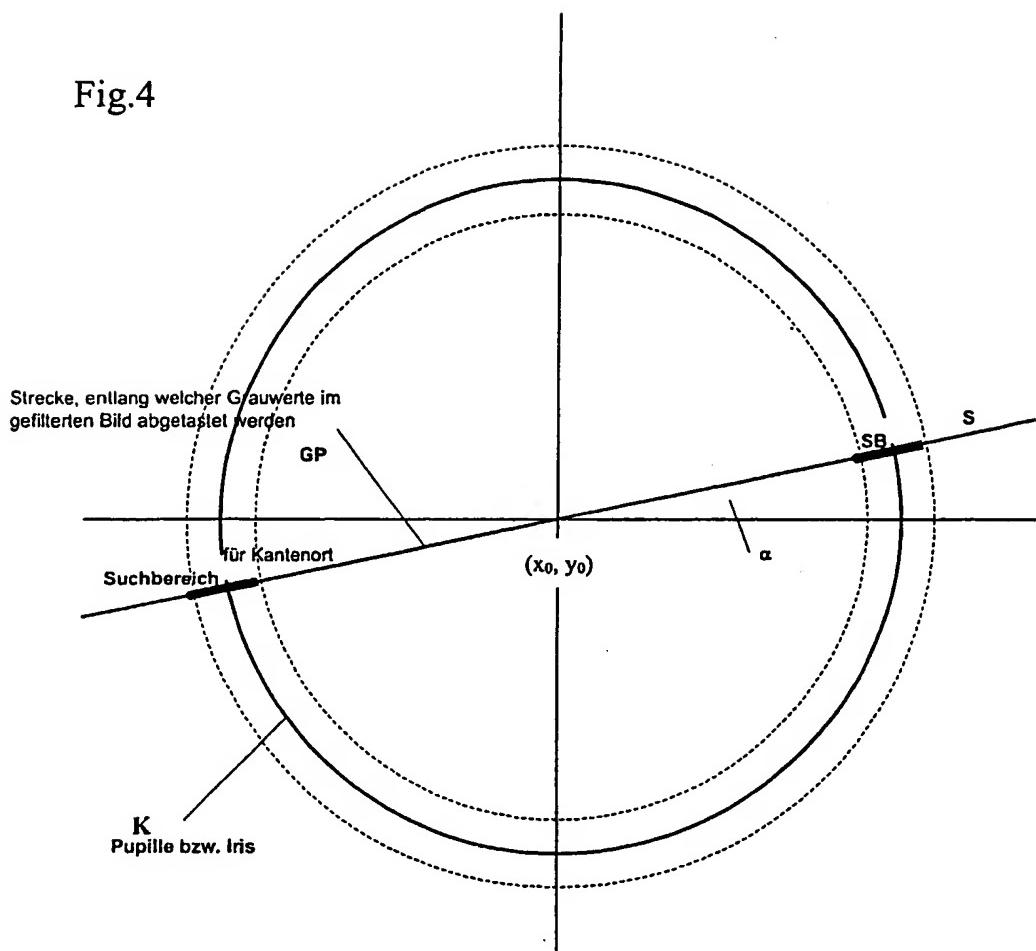


Fig.5

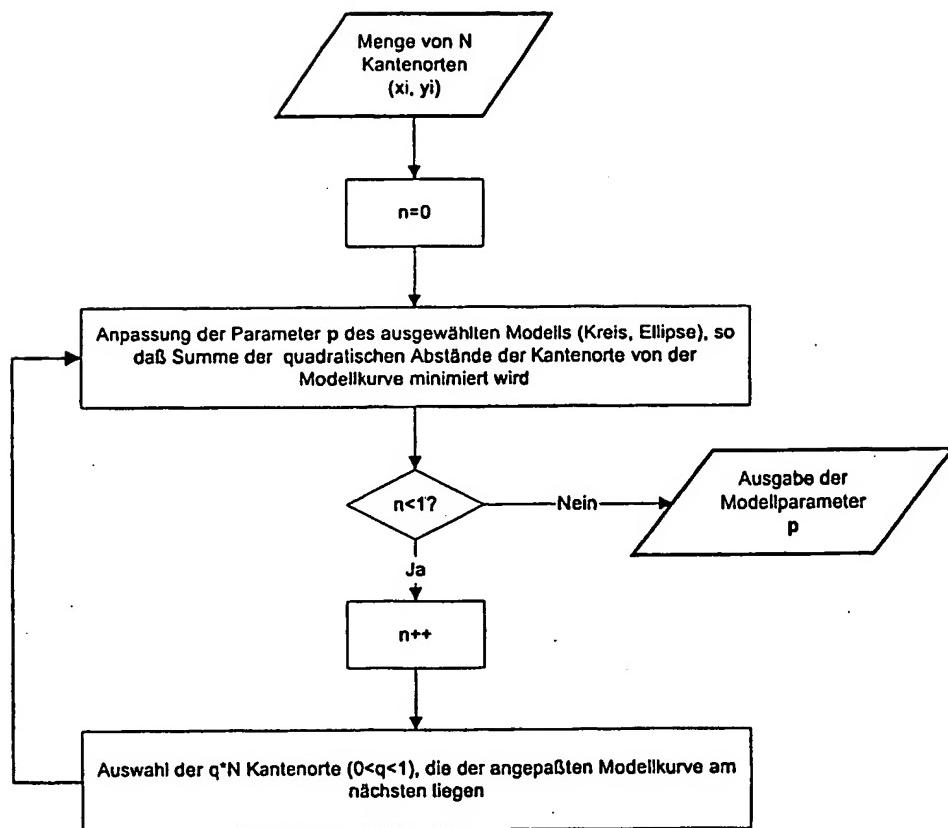


Fig.6

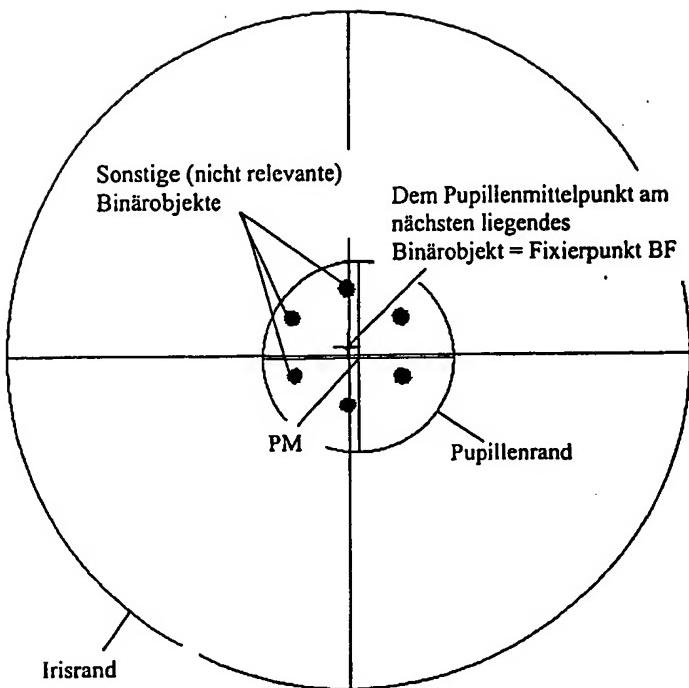
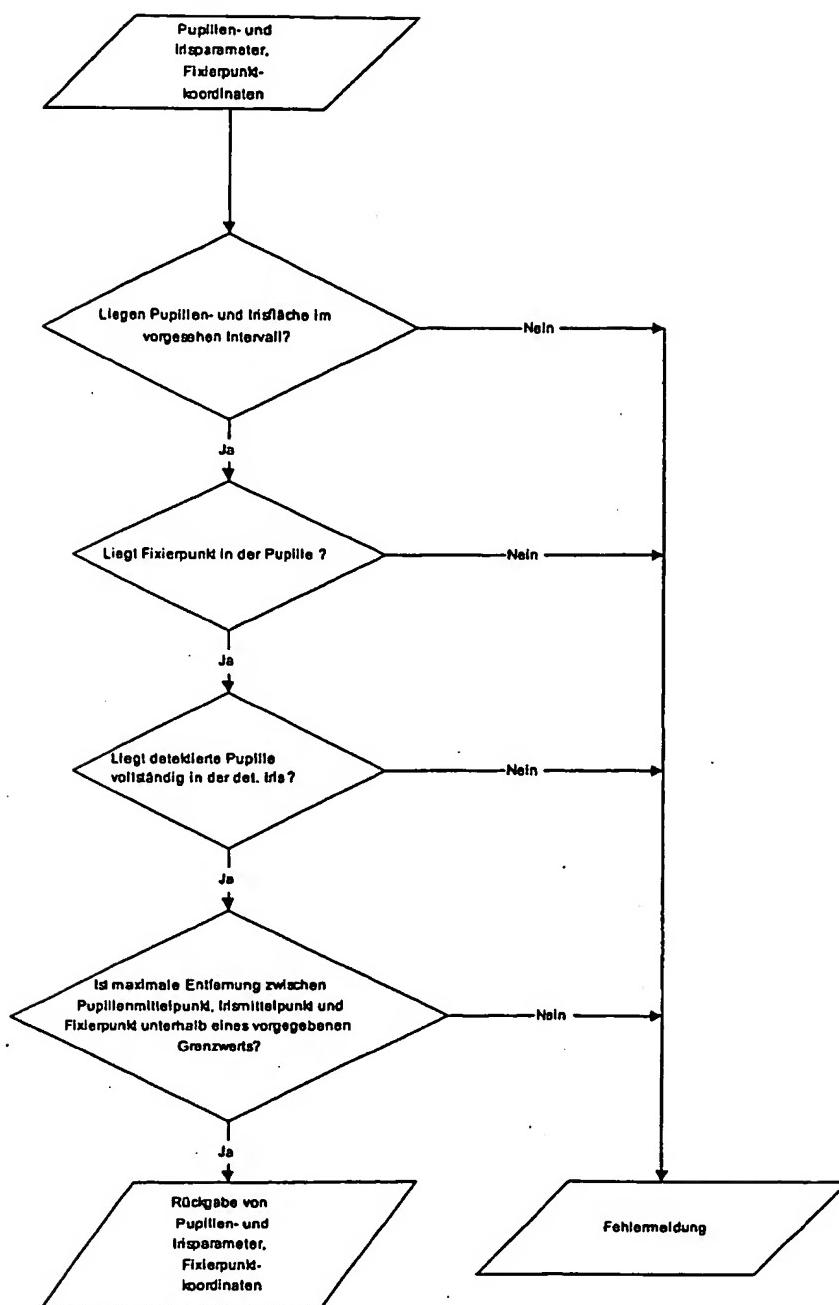


Fig.7



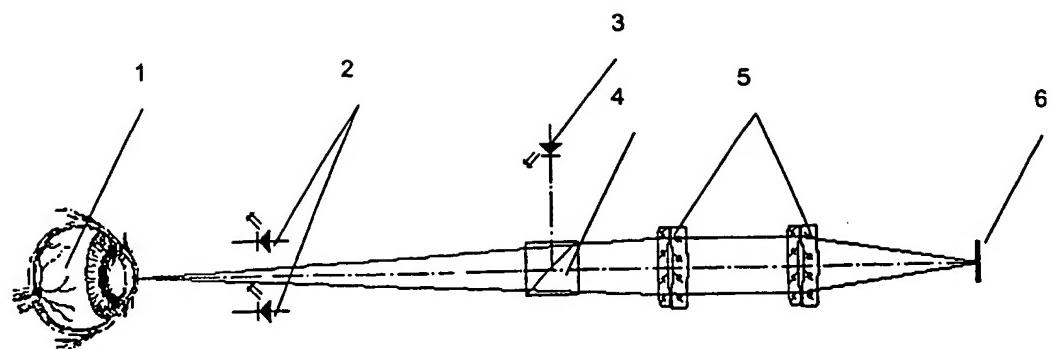


Fig. 8 schematische Darstellung der erfindungsgemäßen Anordnung

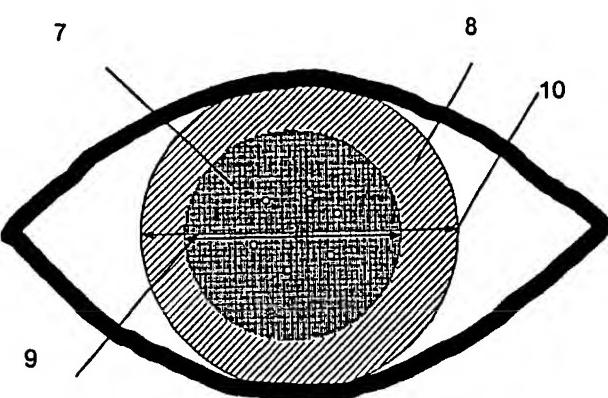


Fig. 9 gegrabtes Bild eines zu vermessenden Auges

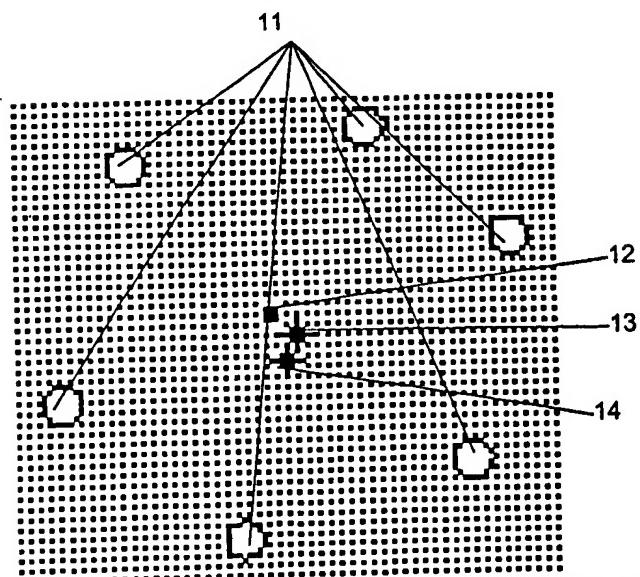
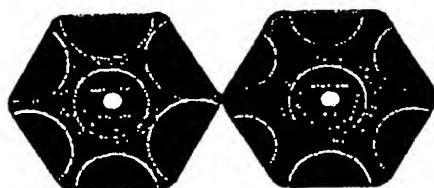


Fig. 10 Vergrößerung des zentralen Teiles von Fig. 9

Fig.11 Weiß-zu-Weiß-Schablone nach Holladay-Godwin:  
AE-1576 Holladay-Godwin  
Cornea Guage



9 / 9

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**